

УДК 537.591.15

## О РЕГИСТРАЦИИ РАДИОСИГНАЛОВ ОТ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ УЛЬТРАВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНЫХ, АЭРОСТАТНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ПРИЕМНИКОВ

В. А. Царев

*Приводится сравнение эффективной площади регистрации радиоизлучения широких атмосферных ливней ультравысоких энергий приемниками, размещенными на поверхности Земли, на аэростатах и спутниках. Обсуждается возможность получения адекватной диаграммы направленности и оценивается точность определения направления прихода ливней с помощью стереопары приемников.*

Одной из наиболее интересных проблем современной астрофизики элементарных частиц является проблема космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ,  $E \geq 5 \cdot 10^{19}$  эВ) [1]. За сорок лет, прошедших после обнаружения КЛУВЭ, удалось зарегистрировать всего лишь несколько десятков подобных событий, поскольку поток КЛУВЭ чрезвычайно мал (около одной частицы на  $\text{км}^2$  в столетие при  $E \geq 10^{20}$  эВ). Для детального изучения КЛУВЭ и проверки моделей, предложенных для их объяснения, необходимо увеличить статистику наблюдений и продвинуться к еще большим энергиям. Это требует создания специализированных установок с гигантской апертурой [2]. В работах [3] было указано на возможность регистрации КЛУВЭ с помощью радиотенн, расположенных на спутниках, которые могли бы детектировать радиоизлучение от широких атмосферных ливней (ШАЛ), инициированных КЛУВЭ в атмосфере Земли. В настоящей работе мы продолжаем обсуждение радиометода регистрации ШАЛ и проводим сравнение спутникового, аэростатного и наземного методов детектирования с точки зрения скорости регистрации событий и точности определения энергии ШАЛ. Также обсуждаются соответствующие диаграммы направленности антенн, оценивается возможная точность определения направления прихода ШАЛ.

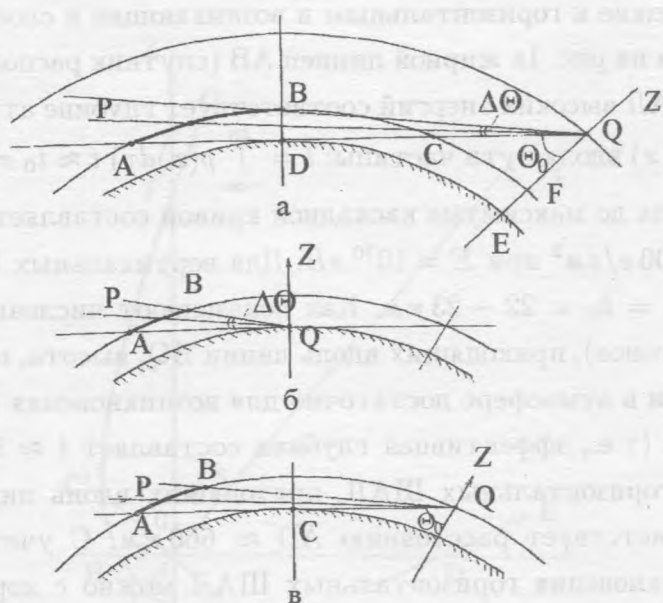


Рис. 1. Геометрия регистрации радиоимпульса ШАЛ (а) со спутника, (б) наземным приемником и (в) с аэростата.

Величина принимаемого радиосигнала характеризуется напряженностью поля или спектральной плотностью потока мощности излучения  $W$ , которая зависит от энергии ШАЛ  $E$ , расстояния до приемника  $r$  и угла излучения (по отношению к оси ШАЛ)  $\alpha$  [3]:

$$W = (E/r)^2 F(\alpha, \ln E). \tag{1}$$

Угол  $\alpha$  связан с длительностью радиоимпульса  $\tau$  (см. [3]). Измеряя  $\tau$ , можно исключить зависимость  $W$  от  $\alpha$ . Тогда энергия ШАЛ может быть найдена по величине радиоимпульса  $W$  и расстоянию  $r$ :

$$E = r(W/F)^{1/2}. \tag{2}$$

С точностью до слабой логарифмической зависимости величина  $F$  может считаться (известной) постоянной. Оценим относительную ошибку  $\delta_E$ , которая вносится при нахождении  $E$  неопределенностью в величине  $r$ . Геометрия регистрации схематически показана на рис. 1 для трех вариантов регистрации. Рассмотрим вначале регистрацию со спутников (рис. 1а). Поскольку радиоизлучение ШАЛ сосредоточено, в основном, в узком переднем конусе (с характерным раствором  $\Delta\alpha \approx 0.1$  [3]), то регистрироваться

будут только ШАЛ, близкие к горизонтальным и возникающие в слое атмосферы, схематически обозначенном на рис. 1а жирной линией АВ (спутник расположен в точке Q). Область зарождения ШАЛ высоких энергий соответствует глубине атмосферы (т.е. интегралу от плотности  $\rho(x)$  вдоль пути частицы:  $t = \int_{-\infty}^{x_0} \rho(x) dx$ )  $t \approx t_0 = 50 \text{ г/см}^2$ . Длина развития ШАЛ от начала до максимума каскадной кривой составляет около  $780 \text{ г/см}^2$  при  $E = 10^{19} \text{ эВ}$  и  $\approx 1100 \text{ г/см}^2$  при  $E = 10^{20} \text{ эВ}$ . Для вертикальных ШАЛ значение  $t_0$  соответствует высоте  $h = h_0 = 22 - 23 \text{ км}$ . Как показывают численные расчеты, для первичных частиц (протонов), приходящих вдоль линии ВQ, высота, при которой количество вещества на пути в атмосфере достаточно для возникновения и развития ШАЛ ультравысоких энергий (т.е., эффективная глубина составляет  $t \approx 900 \text{ г/см}^2$ ), равна  $h = h_1 \approx 30 \text{ км}$ . Для горизонтальных ШАЛ, приходящих вдоль линии АQ, область зарождения ШАЛ соответствует расстоянию  $AD \approx 660 \text{ км}$ . С учетом приведенных величин, область возникновения горизонтальных ШАЛ можно с хорошей точностью представить как "условную границу атмосферы" высотой  $h \approx 30 \text{ км}$ . При  $R \gg H, h$  имеем:

$$L \approx (2RH)^{1/2}, l \approx (2Rh)^{1/2}, S \approx 4\pi R(Hh)^{1/2}[1 + (1/2)(h/H)^{1/2}]. \quad (3)$$

Здесь  $R$  – радиус Земли,  $H$  – высота космического аппарата или аэростата над уровнем Земли,  $h$  – условная граница атмосферы,  $L \equiv DQ$ ,  $l \equiv AD = DC$ .  $S$  – площадь поверхности шарового пояса, образованного вращением дуги АВ вокруг оси  $z$ . Приемник расположен в точке Q. Сигналы от горизонтальных ШАЛ будут приходить с расстояний  $r$ , лежащих в интервале  $L \leq r \leq L + l$ . Таким образом, при заданных  $H$  и  $h$ , величина  $r$  определяется с относительной ошибкой  $\delta_r$ :

$$r = r_0(1 \pm \delta_r); r_0 = L + l/2; \delta_r = (1 + 2L/l)^{-1} = [1 + 2(H/h)^{1/2}]^{-1}, \quad (4)$$

которая, согласно (2), и определяет относительную ошибку  $\delta_E$ , связанную с неопределенностью  $r$ . Угол  $\Theta_0$  и интервал углов  $\Delta\Theta$ , откуда приходят сигналы от ШАЛ, определяются следующими соотношениями:

$$\sin \Theta_0 = R/(R + H), \Delta\Theta \approx h/(2RH)^{1/2}; (H \gg h). \quad (5)$$

Значения параметров  $S, L, \delta_E, \Theta_0$  и  $\Delta\Theta$  для трех значений высоты нахождения спутника  $H = 500, 1000$  и  $2000 \text{ км}$  приведены в таблице.

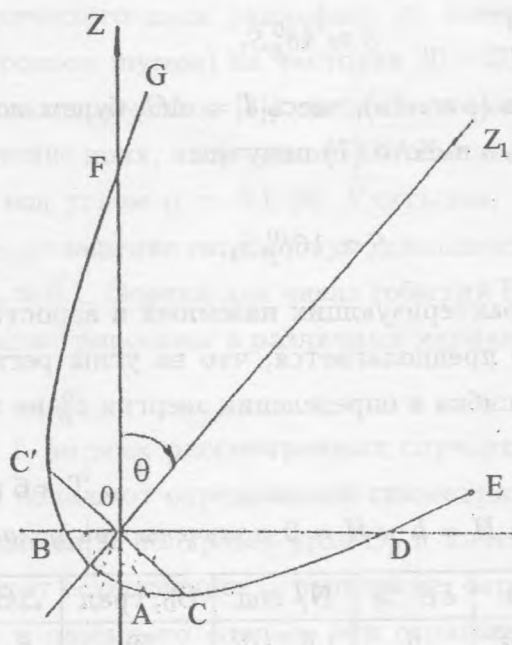


Рис. 2. Параболический отражатель.

При наземном детектировании ( $H = 0$ , рис. 1б) полная площадь поверхности атмосферы, из которой сигналы могут приходить на детектор, составляет в общем случае произвольного угла прихода ШАЛ  $\Theta$  величину  $S_1 = 2\pi Rh \approx 1.2 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ . При этом расстояние  $r \equiv PQ$  от точки зарождения ШАЛ до детектора может меняться в пределах  $h \leq r \leq l$  (здесь  $l = AQ$ ). Если угол  $\Theta$  не измеряется и ничем не ограничен, то значительная неопределенность в величине  $r$  фактически исключает возможность нахождения энергии ШАЛ по величине радиоимпульса. Однако, если диаграмма направленности антенны позволяет ограничить область углов  $\Theta$ , при которых происходит регистрация сигналов, то неопределенность  $\delta_r$  в значениях  $r$  может быть также ограничена. Очевидно, что наиболее выгодной (как с точки зрения достижения наилучшей относительной точности в определении  $E$ , так и для получения наибольшей площади  $S$ ) является регистрация ШАЛ, приходящих из области атмосферы вблизи горизонта. Потребуем, чтобы  $\delta_E = \delta_r$  не превосходила некоторого заданного значения  $\delta_E^0$ . Это накладывает ограничения на область изменения углов  $\Theta$

$$\Delta\Theta \approx 2\delta_E^0(2h/R)^{1/2} \quad (6)$$

и на величину  $S$ :



$$S \approx 4\delta_E^0 S_1. \quad (7)$$

Для высотных аэростатов (рис. 1в), здесь  $l = AC$ , будем полагать  $H = h$ . Тогда соотношение (6) сохраняется, а вместо (7) получим

$$S \approx 16\delta_E^0 S_1. \quad (7a)$$

Значения параметров, характеризующих наземный и аэростатный варианты, приведены в таблице. При этом предполагается, что на углы регистрации  $\Theta$  наложены ограничения, при которых ошибка в определении энергии  $\delta_E^0$  не превосходит 10%.

Т а б л и ц а

Значения  $S$  и  $N$  при  $H = h$  и  $H = 0$  получены при условии  $\delta_E = 10\%$

Н, км	$S, \text{ км}^2$	L, км	$\delta E, \%$	N/ год	$\Theta_0, \text{ град}$	$\Delta\Theta, \text{ рад}$	$\Delta\varphi, \text{ рад}$
2000	$2.1 \cdot 10^7$	$5.1 \cdot 10^3$	6	$1.6 \cdot 10^3$	50	$6 \cdot 10^{-3}$	$4.2 \cdot 10^{-2}$
1000	$1.5 \cdot 10^7$	$3.6 \cdot 10^3$	8	$1.1 \cdot 10^3$	60	$8.5 \cdot 10^{-3}$	$5.6 \cdot 10^{-2}$
500	$1.1 \cdot 10^7$	$2.5 \cdot 10^3$	11	$0.8 \cdot 10^3$	69	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$6.3 \cdot 10^{-2}$
30	$1.9 \cdot 10^6$	$6.2 \cdot 10^2$	10	$5.7 \cdot 10^2$	85	$2 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$
0	$4.8 \cdot 10^5$	$6.2 \cdot 10^2$	10	$1.4 \cdot 10^2$	90	$2 \cdot 10^{-2}$	$10^{-1}$

Зная эффективную площадь  $S$  и плотность потока КЛУВЭ в единицу телесного угла  $J$ , можно оценить ожидаемую скорость регистрации событий  $dN/dt = JS\Delta\Omega$  (где эффективность регистрации полагается равной единице). Здесь  $\Delta\Omega$  – телесный угол относительно направления ШАЛ, внутри которого излучение может быть зарегистрировано приемником. Интенсивность излучения ШАЛ падает с ростом угла излучения  $\alpha$ , и величина  $\Delta\Omega \approx \pi\alpha_{max}^2$  определяется соотношением сигнала и фона (здесь  $\alpha_{max}$  – значение угла  $\alpha$ , при котором сигнал еще может быть отделен от фона). В общем случае радифоны имеют значительную региональную и временную зависимости и различаются для наземного, аэростатного и спутникового вариантов. Анализ, проведенный в [3] для регистрации со спутников, показал, что из соотношения сигнала и фона величина  $\alpha_{max}$  в этом случае может быть выбрана равной  $\approx 0.1$ . Однако при таких углах, длины волн, соответствующие максимуму излучения, попадают в область малой прозрачности ионосферы. Поэтому для спутников будем принимать более консервативную оценку  $\alpha_{max} \approx 0.05$ . При детектировании на Земле или на аэростатных высотах уровень (техногенного) фона увеличивается. Однако величина сигнала также

растет, поскольку ШАЛы регистрируются с меньших расстояний. Типичная величина напряженности электрического поля радифона на поверхности Земли (в регионах с достаточно высоким уровнем шумов) на частотах 30 – 50 МГц (наиболее адекватных для рассматриваемых экспериментов [3]) составляет около  $10 \text{ мкВ}/(\text{мМГц})$  [4]. Это значение близко к величине поля, излучаемого ШАЛ с энергией  $E = 10^{20} \text{ эВ}$  на расстоянии порядка 500 км под углом  $\alpha = 0.1$  [3]. Учитывая, что направленность антенны (см. далее) увеличивает отношение сигнал/шум, для оценок в наземном варианте можно принять значение  $\alpha_{max} \approx 0.1$ . Оценки для числа событий КЛУВЭ (при  $E \geq 10^{20} \text{ эВ}$ ), которые могут быть зарегистрированы в различных вариантах за годичную экспозицию, приведены в таблице.

Как видно из рис. 1, во всех рассмотренных случаях направления прихода полезных сигналов от ШАЛ обладают определенной симметрией относительно оси  $z$ : азимутальный угол  $\varphi$  произволен, а полярный угол  $\Theta_0$  и интервал углов  $\Delta\Theta$  фиксированы. Для спутников  $\Delta\Theta$  имеет естественное ограничение, определяемое высотой  $H$  орбиты (5); для аэростатного и наземного случаев эти ограничения должны быть обеспечены специально (с помощью соответствующей диаграммы направленности приемного устройства) для достижения требуемой точности измерения энергии (6).

В приближении геометрической оптики задача построения антенны с диаграммой направленности, адекватной рассматриваемой геометрии регистрации, аналогична задаче о фокусировке черенковского света, испускаемого релятивистской частицей в среде с большим коэффициентом преломления. Эта последняя задача была решена в работах [5], где для этой цели были предложены отражатели "параболоидного типа" (ОПТ). Аксиально-симметричная (относительно оси  $z$ ) поверхность "параболоидного типа", собирающая радиоволны с указанных выше направлений на облучатель, расположенный в точке  $O$ , образуется вращением вокруг оси  $z$  (а не  $z_1$ !) какого-либо из участков параболы, фокус которой совпадает с точкой  $O$ , а ось  $z_1$  повернута по отношению к оси  $z$  на угол  $\Theta = \Theta_0$  (рис. 2). На рис. 3 показаны пять возможных вариантов, образованных вращением участков AD (а), DE (б), FG (в), АВ (г) ВСС' (д). При фокусировке параллельного потока направленность антенны  $D(D = U(\Theta, \varphi)_{max}/U_{cp}$ , где  $U(\Theta, \varphi)_{max}$  – максимальная интенсивность излучения и  $U_{cp}$  – средняя интенсивность излучения, Вт/стер.) пропорциональна апертуре  $A$ , т.е.  $D = 4\pi A/\lambda^2$ ,  $\lambda$  – длина волны. В отличие от этого, ОПТ фокусируют только конус лучей (с осью симметрии  $z$ ), составляющих с осью  $z$  заданный угол  $\Theta$  (в пределах интервала  $\Delta\Theta \ll 1$ ), и для них  $D \sim d/\lambda$ , где  $d$  – характерный линейный размер отражающей поверхности в плоскости фокусировки

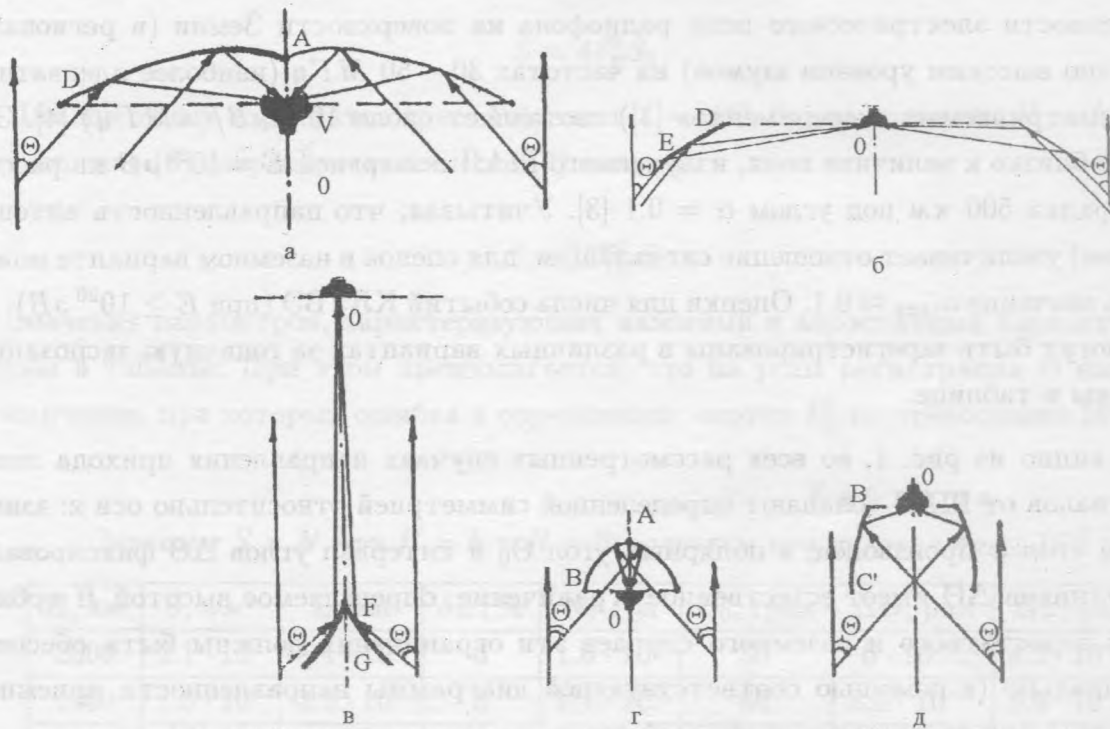


Рис. 3. Различные конфигурации отражающей поверхности "параболоидного типа". В точке  $O$  расположен облучатель (приемник).

(длина хорды, стягивающей соответствующий участок параболы на рис. 2). ОПТ можно, в принципе, использовать для всех рассмотренных вариантов регистрации. (Еще раз подчеркнем, что для спутников коллимация по углу  $\Theta$  возникает естественно из условия  $H \gg h$ , и ОПТ для этого не требуются. В этом случае отражатели могут быть использованы для усиления сигнала или создания систем, экранированных от фоновых сигналов в направлениях с  $\Theta \neq \Theta_0$ .) Мы не рассматриваем здесь технических аспектов создания антенн для регистрации ШАЛ. Заметим только, что в спутниковом варианте в качестве отражающей (и экранирующей) поверхностей могли бы быть использованы металлизированные тонкопленочные конструкции типа "Солнечного паруса" [3], а для аэростатов – участки оболочки аэростата. В качестве примера на рис. 4 показаны варианты экранов и ОПТ для спутника и аэростата.

При регистрации импульса одним приемником с антенной, имеющей аксиально-симметричную диаграмму направленности, азимутальный угол  $\varphi$  прихода сигнала от ШАЛ не определяется. Этот угол может быть найден с помощью двух приемников, работающих в стереомоде и находящихся друг от друга на некотором заданном расстоянии

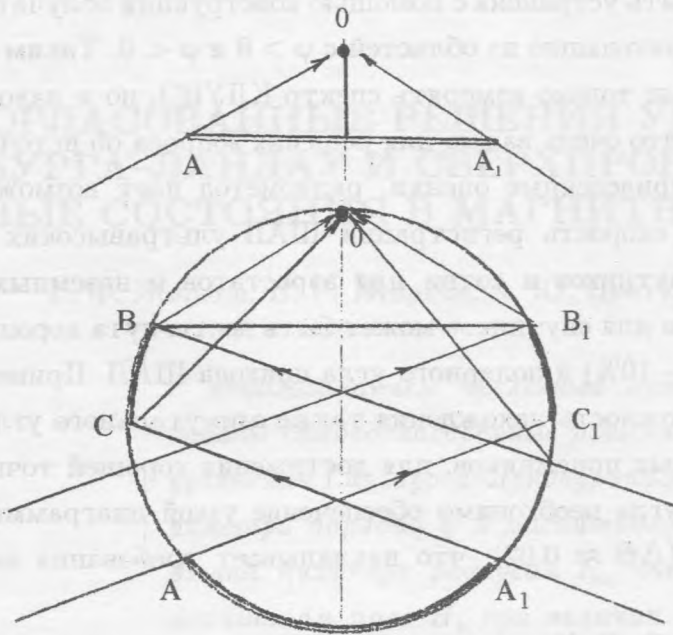


Рис. 4. Примеры применения экранов и ОПГ для спутника и аэростата.  $AA_1$  – экранирующая поверхность;  $BC$ ;  $B_1C_1$  – отражающая поверхность.

а. Разность расстояний между ШАЛ и каждым из приемников может быть выражена через угол  $\varphi$  (который удобно отсчитывать от линии, соединяющей приемники):  $\Delta L \approx a \cos \varphi$ . Соответствующая разность времени прихода импульсов в приемники равна  $\tau = \tau_0 \cos \varphi$ ,  $\tau_0 = a/c$ , где  $c$  – скорость света. Отсюда получаем следующую оценку для неопределенности в нахождении угла  $\varphi$ :  $\Delta\varphi = \Delta\tau / (\tau_0 \sin \varphi)$ . В силу узкой угловой направленности излучения ШАЛ, величина  $a$  не может быть выбрана слишком большой, поскольку в противном случае сигнал не будет зарегистрирован обоими приемниками. Будем полагать  $a = L\alpha_{max}/2$ . Характерная длительность сигнала от ШАЛ составляет  $\tau_s \approx 10^{-6} - 10^{-7}$  сек [3]. Величину  $\tau_s = 10^{-6}$  сек можно принять для оценки точности измерения  $\tau$ . Тогда для ошибки в определении угла  $\varphi$  получаем следующую оценку:  $\Delta\varphi = \tau_s / (\tau_0 \sin \varphi) = \tau_s c / a \sin \varphi$ . Очевидно, что наихудшая чувствительность к углу  $\varphi$  имеет место при  $\varphi = 0$  (или  $\pi$ ). Полагая в этом случае  $\Delta\varphi \approx \varphi$  (или  $\Delta\varphi \approx \pi - \varphi$ ), найдем:  $\Delta\varphi \approx (\tau_s / \tau_0)^{1/2} = (\tau_s c / a)^{1/2}$ . Численные значения наибольшей ошибки в определении азимутального угла  $\delta\varphi$  для рассматриваемых вариантов регистрации приведены в таблице. Очевидно, что в силу симметрии по отношению к замене  $\varphi \rightarrow -\varphi$ , каждому измеренному значению  $\tau$  будут соответствовать два значения угла:  $\pm\varphi$ . Эта



двузначность может быть устранена с помощью конструкции облучателя, позволяющей различать сигналы, приходящие из областей с  $\varphi > 0$  и  $\varphi < 0$ . Таким образом, работа в стереомоде позволяет не только измерять спектр КЛУВЭ, но и находить направления прихода этих частиц, что очень важно для решения вопроса об источниках КЛУВЭ [1].

Как показывают приведенные оценки, радиометод дает возможность обеспечить большую площадь и скорость регистрации ШАЛ ультравысоких энергий (тысячи событий в год для спутников и сотни для аэростатов и наземных приемников при  $E \geq 10^{20}$  эВ). При этом для спутников может быть достигнута хорошая точность определения энергии ( $\approx 5 - 10\%$ ) и полярного угла прихода ШАЛ. Применение стереопары приемников даст возможность нахождения также азимутального угла ШАЛ. В случае наземных и аэростатных приемников, для достижения хорошей точности определения энергии и полярного угла необходимо обеспечение узкой диаграммы направленности приемных устройств ( $\Delta\theta \approx 0.02$ ), что накладывает требования на размеры антенн ( $d \geq \lambda/\Delta\theta$ ).

Автор признателен В. П. Павлюченко за предоставление данных о толщинах атмосферы для различных траекторий и высот и С. М. Кутузову за полезные обсуждения конструкций антенн.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Olinto A. V. Phys. Rept., **333**, 329 (2000); Bertou X., Baraton M., and Letessier-Selvon A. Int. J. Mod. Phys., **A15**, 2182 (2000).
- [2] Cronin J. W. Rev. Mod. Phys., **71** (2), S165 (1999); Ormes J. F. et al. Proc. 25<sup>th</sup> ICRC, Durban, **5**, 273 (1997).
- [3] Пичхадзе К. М., Сысоев В. Г., Царев В. А., Чечин В. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 12, 9 (2000); Царев В. А., Чечин В. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 4, 42 (2001).
- [4] Allan H. R. In Progress in Elementary Particles and Cosmic Ray Physics, **10**, edited by J. G. Wilson and S. G. Wouthuysen (North-Holland, Amsterdam, 1971), p. 171.
- [5] Gogitidze N. Z., Tsarev V. A., and Cheshin V. A. NIM, **A248**, 186 (1986); Гогитидзе Н. З., Царев В. А., Чечин В. А. ВАНТ, **3** (38), 78 (1988).

Поступила в редакцию 14 ноября 2001 г.